

*Отримано аналітичні формули для наближеного розрахунку перепаду тисків на ротаційному фільтрі механічного очищення рідин. Доповнено основи інженерного розрахунку фільтрів удосконаленої конструкції з малим гідравлічним опором*

*Ключові слова: обертовий циліндр, перепад тисків, фільтрування*

*Получены аналитические зависимости для приближенного расчета перепада давлений на ротационном фильтре механической очистки жидкостей. Дополнены основы инженерного расчета фильтров усовершенствованной конструкции с малым гидравлическим сопротивлением*

*Ключевые слова: вращающийся цилиндр, перепад давлений, фильтрование*

*The analytic formulas for estimation of pressure drop on the rotary filter for mechanical cleaning of liquids are obtained. The fundamentals of design calculation of improved filters with low hydraulic resistance are supplemented*

*Key words: rotating cylinder, pressure drop, filtering*

# ГИДРО-ДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РОТАЦИОННОГО ФИЛЬТРА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ

**Е. В. Мочалин**

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
Кафедра теоретической и строительной механики  
Донбасский государственный технический университет  
пр. Ленина, 16, г. Алчевск, Украина, 94204  
Контактный тел.: 050-139-08-43  
E-mail: y\_mochalin@mail.ru

## 1. Введение

Очистка различных жидкостей от твердых механических примесей была и остается одной из важных технических задач, которая характерна для всех отраслей производства. Модернизация оборудования, повышение его производительности и надежности, снижение энергозатрат и возрастающее внимание к экологической безопасности требуют повышения тонкости очистки жидкостей. В работе [1] выполнен обзор существующих методов очистки жидкостей от взвешенных механических примесей и показано, что одними из наиболее универсальных и производительных устройств очистки с тонкостью 10...40 мкм являются так называемые ротационные фильтры (РФ) в которых сепарация взвешенных частиц осуществляется вращающимся фильтрующим цилиндром. Течение жидко-

сти внутри вращающегося проницаемого цилиндра аналогично течению в вихревой камере с боковым подводом. Этим обстоятельством объясняется большое гидродинамическое сопротивление РФ традиционной конструкции, что значительно сужает область их применения. Однако, в работах [2,3] обоснован способ значительного снижения гидродинамических потерь в ротационных фильтрах, а исследование движения жидкости и взвешенных частиц вблизи вращающегося проницаемого цилиндра [4 – 6] определили пути существенного повышения тонкости очистки. На этой основе предложена усовершенствованная конструкция РФ, которая обеспечивает снижение затрат мощности на очистку более чем на порядок и позволяет производить очистку от частиц, размер которых в несколько раз меньше отверстий в фильтрующем цилиндре. Схема такого фильтра представлена на рис. 1.

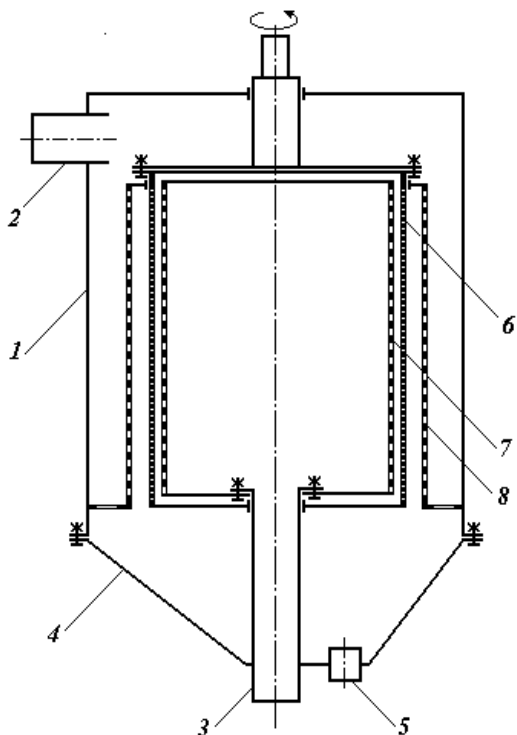


Рис. 1. Конструктивная схема ротационного фильтра:  
 1 – корпус; 2 – патрубок подвода жидкости; 3 – патрубок отвода жидкости; 4 – бункер; 5 – сливная пробка;  
 6 – вращающийся фильтрующий цилиндр;  
 7 – неподвижная внутренняя проницаемая цилиндрическая вставка; 8 – наружная цилиндрическая проницаемая вставка

Одним из элементов проектировочного расчета РФ является определение его гидродинамического сопротивления или перепада давлений. Этому вопросу и посвящена настоящая работа.

**2. Основные результаты**

Анализируя схему на рис. 1, приходим к выводу, что общий перепад давления складывается, в первую очередь, из перепадов, обусловленных местными сопротивлениями при входе жидкости в фильтр и выходе из него (через патрубки 2,3), а также перепада давления между внутренней поверхностью вставки 8 и наружной поверхностью вставки 7. Потери в корпусе фильтра (снаружи распределяющей поток вставки 8) и в области фильтрата (внутри неподвиж-

ной вставки 7) пренебрежимо малы вследствие относительно большого объема этих областей и, следовательно, малых скоростей движения жидкости.

Для случая, когда сопротивление на входе в фильтр обусловлено резким расширением при выходе из входного патрубка, а сопротивление на выходе – резким сужением при входе в выходной патрубков из камеры фильтрата (см. рис. 1), следуя известным в гидравлике формулам (см., например, [7]), можем записать:

$$\Delta p_{in} = \frac{\rho}{2} \left( \frac{4Q}{\pi d_{in}^2} \right)^2, \tag{1}$$

$$\Delta p_{out} = 0.5 \left( 1 - \frac{d_{out}^2}{4R_3^2} \right) \frac{\rho}{2} \left( \frac{4Q}{\pi d_{out}^2} \right)^2, \tag{2}$$

где  $\rho$  - плотность жидкости,  $Q$  - секундный объемный расход,  $\Delta p_{in}, \Delta p_{out}$  - перепады давлений на выходе из входного патрубка и на входе в выходной патрубков;  $d_{in}, d_{out}$  - диаметры входного и выходного патрубков;  $R_3$  - внутренний радиус неподвижной вставки 7 (радиус камеры фильтрата).

Основную задачу представляет определение падения давления при прохождении жидкости через кольцевую область снаружи фильтрующего цилиндра, сам вращающийся цилиндр и зазор между его внутренней поверхностью и наружной поверхностью неподвижной внутренней вставки. Всю необходимую информацию о течении, в том числе и о распределении давления можно получить путем численного моделирования в достаточно подробной постановке. Такое численное решение, отражающее все особенности движения жидкости вблизи вращающегося проницаемого цилиндра, обосновано в работе [8] и использовано для изучения особенностей гидродинамики ротационных фильтров в работах [4,6,9]. Однако нашей целью здесь является получение аналитических зависимостей для практических расчетов, не требующих значительных вычислительных затрат и большой квалификации в области вычислительной гидродинамики.

Рассмотрим характерные зависимости, определяющие изменение окружной скорости и давления вдоль радиуса характерного поперечного сечения рассматри-

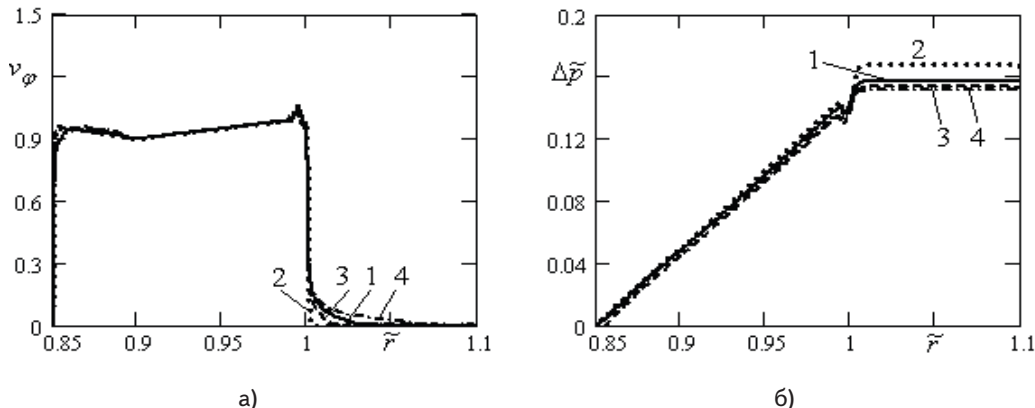


Рис. 2. Изменение безразмерной окружной скорости (а) и безразмерного избыточного давления (б) по сечению рабочей полости ротационного фильтра:  
 1 –  $Re_\phi = 1.99 \cdot 10^5, v_0 = 6.58 \cdot 10^{-3}$ ; 2 –  $Re_\phi = 1.99 \cdot 10^5, v_0 = 1.0 \cdot 10^{-2}$ ;  
 3 –  $Re_\phi = 2.99 \cdot 10^5, v_0 = 6.67 \cdot 10^{-3}$ ; 4 –  $Re_\phi = 4.98 \cdot 10^5, v_0 = 5.0 \cdot 10^{-3}$

ваемой области, проходящего через отверстие в перфорированном вращающемся цилиндре. Соответствующие графики получены путем численных расчетов и представлены на рис. 2 в безразмерном виде. В качестве линейного масштаба принят наружный радиус фильтрующего цилиндра ( $R_1$ ). Масштаб скорости  $W = \Omega R_1$  - окружная скорость его поверхности ( $\Omega$  - угловая скорость). Масштабом давления является скоростной напор  $\rho W^2$ . Из представленных данных видно, что изменение скорости и давления характеризуется регулярностью и имеет близкий вид при различных сочетаниях определяющих безразмерных параметров  $Re_\phi = WR_1/\nu$ ,  $v_0 = Q/(SW)$  ( $S$  - площадь фильтрующей поверхности) в условиях отсутствия вторичных течений снаружи вращающегося цилиндра.

Характер изменения окружной скорости и давления вдоль рассматриваемого сечения (рис. 2) позволяет выделить следующие характерные области: зазор между вращающимся цилиндром и неподвижной внутренней вставкой ( $\tilde{r} \in [\tilde{R}_3, \tilde{R}_2]$ ), отверстия во вращающемся цилиндре ( $\tilde{r} \in [\tilde{R}_2, \tilde{R}_1 = 1]$ ), область входа жидкости в отверстия во вращающемся цилиндре и пограничный слой на его поверхности ( $\tilde{r} \sim 1$ ), внешняя область кольцевого зазора снаружи вращающегося цилиндра ( $\tilde{r} = [1 + \delta, \tilde{R}_0]$ ). В данном случае в расчетах принято:  $\tilde{R}_3 = 0.85$ ,  $\tilde{R}_2 = 0.9$ ,  $\tilde{R}_0 = 1.1$ .

В первой области можно в первом приближении считать окружную скорость постоянной:

$$V_\phi = \Omega R_4 \quad (v_\phi = \tilde{R}_4). \quad (3)$$

В пределах второй области имеем линейное изменение окружной скорости:

$$V_\phi = \Omega r \quad (v_\phi = \tilde{r}). \quad (4)$$

Учитывая постоянство давления почти во всей области снаружи фильтроэлемента ( $\tilde{r} \in [1, \tilde{R}_2]$ ), будем считать здесь  $V_\phi = 0$ . Для осесимметричного и неизменяющегося в осевом направлении течения жидкости в пренебрежении радиальной скоростью и «турбулентным давлением» из уравнения движения имеем

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{V_\phi^2}{r},$$

или в безразмерной форме:

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{r}} = \frac{v_\phi^2}{\tilde{r}}. \quad (5)$$

Интегрируя уравнение (5) вдоль первого из охарактеризованных выше участков с учетом (3), получаем следующее выражение для перепада давлений на этом участке:

$$\Delta \tilde{p}_{3,2} = \tilde{R}_2^2 \ln \frac{\tilde{R}_2}{\tilde{R}_3}. \quad (6)$$

Интегрирование вдоль второго участка с использованием (4) дает:

$$\Delta \tilde{p}_{2,1} = \frac{1}{2} (1 - \tilde{R}_2^2). \quad (7)$$

На участке с  $V_\phi = 0$  дополнительного перепада давлений не возникает.

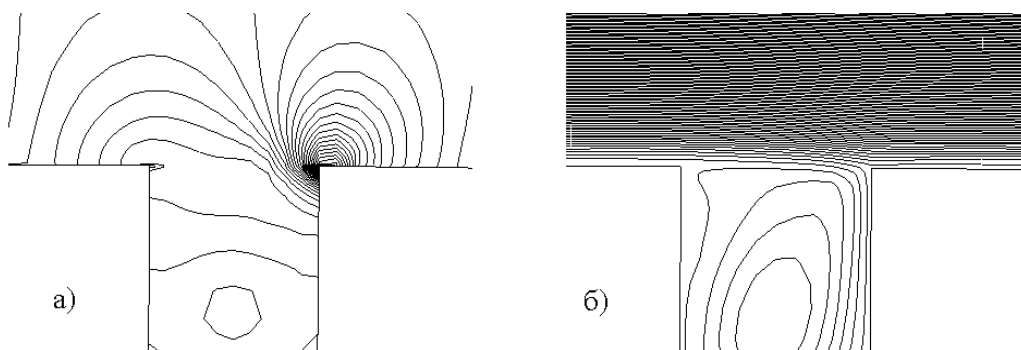


Рис. 3. Изолинии давления (а) и линии тока относительного движения жидкости (б) в районе входа жидкости в отверстие вращающегося цилиндра  $Re_\phi = 2.985 \cdot 10^3$ ,  $v_0 = 0.0067$

Наибольшую сложность представляет аналитическое определение перепада давлений в области  $\tilde{r} \approx 1$ . Анализ показывает, что этот перепад не обусловлен уравновешиванием центробежных сил, вызванных вращением жидкости в пограничном слое. Для выяснения причин падения давления в районе поверхности вращающегося перфорированного цилиндра, рассмотрим результаты численного моделирования, представленные на рис. 3. Очевидно, что наиболее резкое изменение давления (о чем можно судить по сгущению изолиний) имеет место у задней по ходу вращения цилиндра кромки проходного отверстия, то есть в том месте, где в отверстие входит проходящая через цилиндр жидкость.

Падение давления объясняется вязкой диссипацией энергии в области больших градиентов скорости. Следует заметить, что большие градиенты скорости у поверхности цилиндра между отверстиями не приводят к падению давления в жидкости, так как источником энергии, рассеиваемой посредством вязкого трения в этой области, является привод вращения фильтрующего цилиндра.

Таким образом, интересующий нас локализованный перепад давления обусловлен прохождением транзитного потока через область больших градиентов скорости при входе жидкости в отверстие цилиндра.

Выполненный анализ свидетельствует о возможности представления интересующего нас перепада давлений на входе жидкости в отверстия цилиндра

на основе коэффициента местного сопротивления, то есть, в виде:

$$\Delta p_1 = \xi \frac{1}{2} \rho \left( \frac{V_o}{k_s} \right)^2,$$

где  $k_s$  - коэффициент «живого» сечения фильтрующего цилиндра.

Переходя к безразмерной записи, получим

$$\Delta \tilde{p}_1 = \xi \frac{1}{2} \left( \frac{v_o}{k_s} \right)^2. \quad (8)$$

Коэффициент сопротивления  $\xi$  зависит от угловой скорости цилиндра и скорости фильтрования. В наиболее общем виде эти факторы характеризуются безразмерными числами  $Re_\phi, v_o$ . Обработка результатов численных расчетов позволила предложить для функции  $\xi(Re_\phi, v_o)$  следующий вид:

$$\xi = \max \left( 27, \left\{ 95.78 + 8.47 \cdot 10^{-6} Re_\phi - (4580 + 0.00487 Re_\phi) v_o \right\} \right). \quad (9)$$

Таким образом, общий перепад давления в рабочей области ротационного фильтра складывается из трех составляющих:

$$\Delta \tilde{p}_w = \Delta \tilde{p}_{3,2} + \Delta \tilde{p}_{2,1} + \Delta \tilde{p}_1, \quad (10)$$

где слагаемые в правой части определяются равенствами (6) - (8).

Упрощенный расчет на основе формул (6) - (11) позволяет определить перепад давлений с точностью

порядка 1% по сравнению с подробным численным расчетом.

Полное гидродинамическое сопротивление ротационного фильтра характеризуется суммой перепадов давлений в рабочей полости фильтра и перепадов давлений на входе в фильтр и выходе из него

$$\Delta p = \Delta p_{in} + \Delta p_{out} + \Delta p_w.$$

Для определения  $\Delta p_w = \rho \Omega^2 R_1^2 \Delta \tilde{p}_w$  получены зависимости (6) - (11). Величины  $\Delta p_{in}, \Delta p_{out}$ , в частности, можно определять на основе формул (1),(2).

### 3. Выводы

Выполненными исследованиями получены аналитические зависимости, позволяющие с достаточной хорошей точностью рассчитать перепад давлений на ротационном фильтре усовершенствованной конструкции, которая характеризуется малым гидродинамическим сопротивлением и возможностью сепарации частиц с размерами в несколько раз меньшими размера отверстий в фильтрующем цилиндре.

Тем самым дополнены основы инженерного расчета таких фильтров, имеющих большие перспективы применения.

Одним из наиболее актуальных направлений дальнейших исследований в данном направлении является обоснование расчетных зависимостей для оценки тонкости очистки жидкостей ротационными фильтрами.

### Литература

1. Мочалин Е.В. Проблемы промышленной очистки жидкостей от механических загрязнений и применение ротационных фильтров [Текст] / Е.В. Мочалин, А.А. Халатов // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, №2. – С. 57 - 69.
2. Мочалин Е.В. Формирование вихревой структуры закрученных течений в цилиндрической области с проницаемой боковой поверхностью [Текст] / Е.В. Мочалин // Вісник Сумського державного університету. – 2003. – №12(58). – С. 36 - 41.
3. Мочалин Е.В. Полуэмпирическая модель вихревого течения внутри вращающегося проницаемого цилиндра [Текст] / Е.В. Мочалин // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 50. – С.202 - 211.
4. Мочалин Е.В. Гидродинамические особенности протекания жидкости через вращающуюся сетку [Текст] / Е.В. Мочалин // Промислова гідраліка і пневматика. – 2007. – №2(16). – С. 53 - 60.
5. Мочалин Е.В. Исследование движения взвешенных частиц вблизи вращающегося отсасывающего цилиндра [Текст] / Е.В. Мочалин // Промислова гідраліка і пневматика. – 2005. – №2(8). – С. 61 - 65.
6. Мочалин Е.В. Влияние конструкции фильтроэлемента ротационного фильтра на гидродинамический эффект очистки жидкости [Текст] / Е.В. Мочалин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 5/3 (29). – С. 46 - 51.
7. Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебник для вузов [Текст] / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982. – 672 с.
8. Мочалин Е.В. Численное моделирование течений вязкой жидкости в рабочей полости ротационного фильтра [Текст] / Е.В. Мочалин // Сб. науч. трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ, 2007. – Вып. 23. – С. 169 - 183.
9. Мочалин Е.В. Моделирование переходных течений жидкости в сечении вращающегося сетчатого фильтроэлемента [Текст] / Е.В. Мочалин // Вісник Східноукраїнського національного університету. – 2007. – №3(109). – С. 99 - 110.